基于 Matlab的电力系统谐波电流实时检测方法仿真

勇 明[1] ,段大鹏[2]

(1. 无锡供电公司 ,江苏 无锡 214061; 2. 上海交通大学 电气工程系 ,上海 200240)

摘 要:讨论了 2种基于瞬时无功功率理论的谐波电流检测方法 ,给出了检测系统的框图 ,并应用 matlab仿真平台进行了仿真研究 ,给出了仿真波形 ,验证了该方法的正确性。

关键词:谐波电流 ;瞬时无功功率 ;实时检测

作者简介:勇 明 (1974-) ,男 ,工程师 ,从事电力系统运行管理工作。

中图分类号: TM714 **文献标志码**: B **文章编号**: 1001-9529(2009)04-0614-04

Matlab-based real-time detection methods for harmonic current of power systems

YONG Ming[1], *DUAN Da-peng*[2]

(1. Wuxi Power Supply Company, Wuxi 214061, China;

2. Dept of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200240, China)

Abstract: Based on the theory of instantaneous reactive power, two harmonic current detection methods were discussed. Simulation using Matlab proved the methods effective.

Key words: harmonic current; instantaneous reactive power; real-time detection

近年来 ,学者们提出了众多的电网谐波电流检测方法 ,如:基于傅利叶变换、瞬时无功功率理论、自适应滤波、小波分析等的谐波电流检测方法 ,其中研究和应用最为广泛的应属基于瞬时无功功率理论的谐波和无功电流检测方法。

1 瞬时无功功率理论概述

设三相电路的各相电压瞬时值和电流瞬时值

[1] [3] 刘传润. 北斗卫星导航定位系统的功能原理与前景展望[J]. 中国水运, 2008, 8(1): 165-166.

[4] 周 露, 刘宝忠. 北斗卫星定位系统的技术特征分析与应用[J]. GNSS World of China, 2004, 4: 12-16.

[5] 李俊锋. "北斗"卫星导航定位系统与全球定位系统之比较分析[J]. 北京测绘, 2007, 1: 51-53.

[6] 常乃超, 兰 洲, 甘德强, 等. 广域测量系统在电力系统分析及控制中的应用综述[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 46-50.

[7] 李 建, 谢小荣, 韩英铎, 等. 北斗卫星导航系统与 GPS 互备授时的分布式相量测量单元[J]. 电网技术, 2005, 29(9): 1-4.

[8] Jim Y Cai, Zhenyu Huang, John Hauer, et al. Current Status and Experience of WAMS Implementation in North America [J]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference, 2005: 1-7.

[9] J F Hauer, D J Trudnowski, J G DeSteese. A Perspective on WAMS Analysis Tools for Tracking of Oscillatory Dynamics [J]. 2007: 1-10.

[10] M La Scala, M De Benedictis, S Bruno, et al. Development of applications in WAMS and WACS an international cooperation experience[J]. 2006.

[11] S Bruno, M De Benedictis, M La Scala. Integrating Dynamic Optimization Methodologies with WAMS technologies [J]. 2007: 1-8.

[12] Yutaka Ota, Takuhei Hashiguchi, Hiroyuki Ukai, et al. Monitoring of Interconnected Power System Parameters using PMU based WAMS[J]. 2007: 1-8.

[13] Enrique Martínez Martínez. Wide area measurement & control system in Mexico[J]. DRPT, 2008: 156-161.

[14] A B Leirbukt, J O Gjerde, P Korba, et al. Wide Area Monitoring Experiences in Norway[J]. PSCE, 2006: 353-360.

[15] 邸光宇, 王彦宏, 贾红军. 北斗卫星导航系统在农村电力系统中的信息化应用[J]. 卫星与网络, 2007(3): 62-63.

[16] 尚 力, 于占勋, 荆 铭, 等. 山东电网广域实时动态监测系统[J]. 山东电力技术, 2008(1): 3-7.

收稿日期: 2008-11-17

本文编辑:王志胜

分别为 u_a、u_b、u_c 和 i_a、i_b、i_c,分别将它们变换到两相正交静止 αβ坐标系中,得到该坐标系下的两相瞬时电压为 u_α、u_β,两相瞬时电流为 i_α、i_β,各向量见图 1。

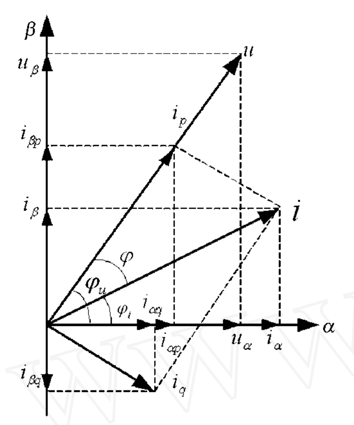


图 1　αβ坐标系的电压、电流矢量

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中　$C_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$——等功率变换矩阵。

图 1所示的 αβ平面坐标系当中,矢量 u_α、u_β 和 i_α、i_β 分别可合成旋转电压矢量 u和旋转电流矢量 i,即

$$u = u_\alpha + u_\beta = u \angle \phi_u \tag{3}$$

$$i = i_\alpha + i_\beta = i \angle \phi_i \tag{4}$$

如图 1中所示,三相电路瞬时有功电流 i_p 和瞬时无功电流 i_q 分别定义为矢量 i在矢量 u及其法线上的投影。即将电流矢量 i分解为 2个分量,一个与电压矢量 u同方向的分量为有功电流 i_p,而另一个与电压矢量 u垂直 (即正交)的分量为无功电流 i_q

$$i_p = i\cos\phi \tag{5}$$

$$i_q = i\sin\phi \tag{6}$$

式中　$\phi = \phi_u - \phi_i$——电压与电流的相位差。

将三相电路的瞬时有功功率 p和瞬时无功功率 q分别定义为电压矢量 u的模与三相瞬时有功电流 i_p 和瞬时无功电流 i_q 的乘积,即

$$p = u\, i_p \tag{7}$$

$$q = u\, i_q \tag{8}$$

由图中各矢量的关系,将式 (5)、(6)及 $\phi = \phi_u - \phi_i$ 代入式 (7)、(8)中,并表示成矩阵的形式得

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = C_{pq} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{9}$$

式中　$C_{pq} = \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix}$。

将式 (1)、(2)代入式 (9),可得到瞬时功率 p、q对于三相电压、电流的表达式

$$p = u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \tag{10}$$

$$q = u_\beta i_\alpha - u_\alpha i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} [(u_b - u_c) i_a + (u_c - u_a) i_b + (u_a - u_b) i_c] \tag{11}$$

如图 1所示,α、β相的瞬时无功电流 $i_{\alpha q}$、$i_{\beta q}$ (瞬时有功电流 $i_{\alpha p}$、$i_{\beta p}$)分别为三相瞬时无功电流 i_q (瞬时有功电流 i_p)在 α、β坐标轴上的投影,即

$$\begin{cases} i_{\alpha p} = i_p \cos\phi_u \\ i_{\beta i} = i_p \sin\phi_u \\ i_{\alpha q} = i_q \sin\phi_u \\ i_{\beta q} = i_q \cos\phi_u \end{cases} \tag{12}$$

某一相的瞬时有功电流和瞬时无功电流也可称为该相的瞬时电流的有功分量和无功分量。

而三相电路各相瞬时无功电流分量 i_{aq}、i_{bq}、i_{cq} 是 α、β两相的瞬时无功电流 $i_{\alpha q}$、$i_{\beta q}$ 通过两相变换到三相所得的结果,同理可得三相瞬时有功电流分量。又由于 $C_{\alpha\beta}^{-1} = C_{\alpha\beta}^{T}$,因此可得

$$\begin{bmatrix} i_{aq} \\ i_{bq} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta}^{-1} \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta}^{T} \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$\begin{bmatrix} i_{ap} \\ i_{bp} \\ i_{cp} \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta}^{-1} \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta}^{T} \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} \tag{14}$$

由以上定义与分析可见,瞬时无功功率理论将电机学中的双反应理论引入三相电路的分析当中,将三相电压或电流的瞬时值变换到两相正交坐标系当中,为功率量的分析与计算带来了方便。该理论突破了传统的功率定义,系统定义了电流的瞬时有功电流、瞬时无功电流、瞬时有功功率、瞬时无功功率等概念,同时适用于正弦电路与非正弦电路当中,包容了正弦电路的传统功率理论。

2 基于瞬时无功功率理论的谐波电流检测方法

采用傅利叶分析检测无功电流的方法具有实时性差、运算量大的缺点,根据传统功率定义构造的检测方法至少需要一个周期才能得出检测结果。而基于瞬时无功功率理论的电流检测方法则可以实现无功—谐波电流的实时检测。

2.1 pq检测法

pq法检测原理见图 2。图中上标 -1表示矩阵的逆,坐标变换矩阵 $C_{\alpha\beta}$、$C_{\alpha\beta}^T$、C_{pq}分别与式(2)、(9)中相同。

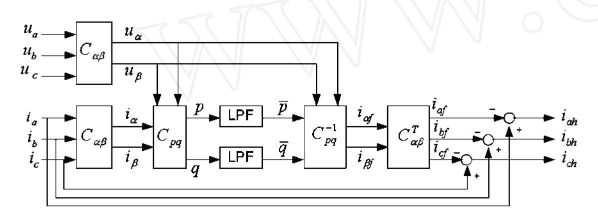


图 2 pq法检测原理框图

三相电压、电流经过三相到两相变换后,相乘得到瞬时有功功率 p与瞬时无功功率 q,经过低通滤波器 LPF得到两者的直流分量$\bar{p}$、$\bar{q}$,然后进行由两相到三相的逆变换,得到三相电流的基波分量 i_{af}、i_{bf}、i_{cf},与原三相电流相减后得到三相谐波电流 i_{ah}、i_{bh}、i_{ch};若断开无功通道,则检测出的是无功—谐波电流的和 $i_{aq}+i_{ah}$、$i_{bq}+i_{ah}$、$i_{cq}+i_{ah}$;若略去无功通道中的低通滤波器,同时将有功通道中的 LPF换成高通滤波器(HPF),直接经逆变换也可得到无功—谐波电流的和;若断开有功通道,同时略去无功通道中的低通滤波器,则直接经逆变换可以无延时的得到三相瞬时无功电流分量 i_{aq}、i_{bq}、i_{cq}。同时注意到 $C_{pq}^{-1}=\frac{1}{u^2}C_{pq}$,由两相到三相的逆变换公式为

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta}^{-1} C_{pq}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{u^2} C_{\alpha\beta}^T C_{pq} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \tag{15}$$

当三相电压发生畸变时,式中的 u不再为稳定值,因此不能准确检测出三相瞬时基波正序无功电流分量,而下面将要讨论的 $i_p i_q$法则不存在这个缺点。

2.2 $i_p i_q$检测法

$i_p i_q$法检测原理见图 3。图中 $C = \begin{bmatrix} \sin\omega t & -\cos\omega t \\ -\cos\omega t & -\sin\omega t \end{bmatrix}$,为由 αβ静止坐标系到旋转坐标系的变换矩阵。

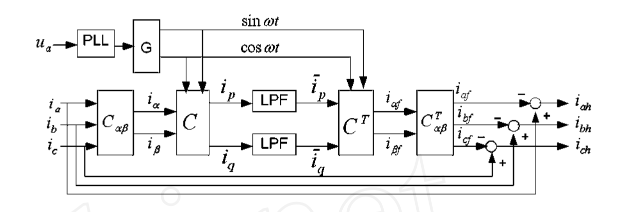


图 3 $i_p i_q$法检测原理框图

由一个锁相环(PLL)和一个正、余弦信号发生电路 G得到 $\sin\omega t$和 $-\cos\omega t$。首先将三相电流信号变换到两相静止 αβ坐标系,再将其变换到两相同步旋转 dq坐标系下,得到 2个相互正交的电流分量—有功电流 i_p与无功电流 i_q,经过低通滤波器 LPF得到两者的直流分量$\bar{i}_p$、$\bar{i}_q$,然后进行由两相到三相的逆变换,便得到三相电流的基波分量 i_{af}、i_{bf}、i_{cf},与原三相电流相减后得到三相谐波电流 i_{ah}、i_{bh}、i_{ch};若断开无功通道,则检测出的是无功—谐波电流的和 $i_{aq}+i_{ah}$、$i_{bq}+i_{ah}$、$i_{cq}+i_{ah}$;若略去无功通道中的低通滤波器,同时将有功通道中的 LPF换成高通滤波器(HPF),直接经逆变换也可得到无功—谐波电流的和;若断开有功通道,同时略去无功通道中的低通滤波器,则直接经逆变换可以无延时地得到三相瞬时无功电流分量 i_{aq}、i_{bq}、i_{cq}。由两相到三相的逆变换公式为:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta}^T C^T \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} \tag{16}$$

由式(16)可见,由于锁相环 PLL与变换矩阵 C的引入,电压波形的畸变不会影响到电流检测的结果。基于瞬时无功功率理论的两种无功—谐波电流检测方法,均能够实时地检测出三相电力系统中的无功—谐波电流分量,可以用模拟电路实现,也可以用数字电路实现。当用模拟电路实现时,pq方法需要 10个乘法器和 2个除法器,而 $i_p i_q$方法需要一个锁相环、一个信号发生器和 8个乘法器。

3 仿真分析

3.1 pq检测法仿真

为方便研究,现只对检测无功电流的情况进

行仿真。根据图2所示的pq检测法,应用MATLAB/Simulink&SimPowersystems搭建仿真平台,对典型的三相二极管整流电流电路进行仿真,主电路仿真结构见图4。电力系统及仿真参数设置如下:采用380 V工频三相电力系统Source,0.2 km PI电力传输线路Line,三相二极管整流器Bridge,整流器直流侧接15 kW/3 kVar阻容负载Load,仿真时间设定为0.1 s,B1为三相电压、电流测量模块,仿真算法为变步长ode45法,采样时间$Ts=2e-6$,相对容差为10^{-4}。根据图2搭建pq法谐波检测系统。

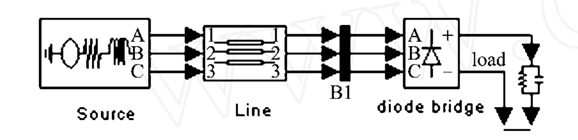


图4　pq检测法仿真系统结构图

仿真结果见图5,此处仅取A相数据。图中由上至下各波形分别为A相电压u_a、电流i_a、基波电流i_f、谐波电流i_h。由仿真结果可见,电力系统中接入三相非线性负载以后,电流发生畸变,为典型的三相不控整流阻容负载的电流波形,含有$6k\pm1$次谐波分量。应用基于瞬时无功功率理论的谐波电流pq检测法,可以实时地检测出电流当中的高次谐波电流分量。经过适当的变换,还可以检测系统的无功电流分量。

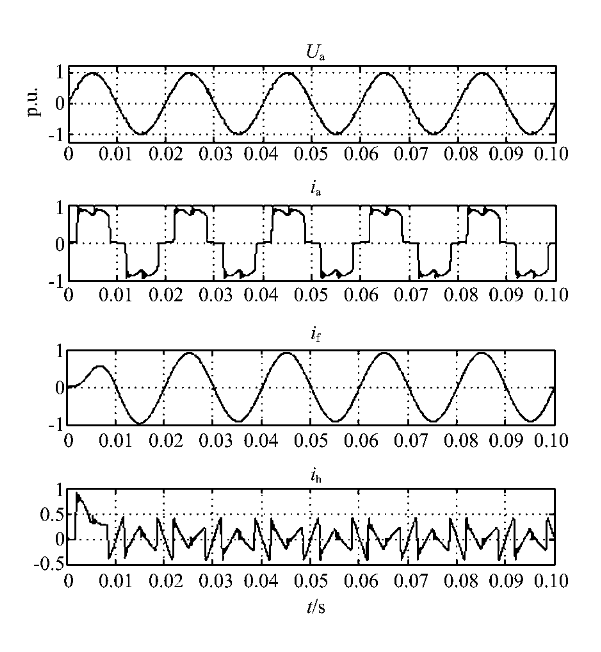


图5　仿真波形图

3.2　$i_p i_q$检测法仿真

根据图3所示的$i_p i_q$检测法,将图4中的pq法无功电流检测系统替换为$i_p i_q$法无功电流检测系统,引入锁相环PLL模块,其余部分不变,电力系统及仿真参数设置相同。仿真结果与图5相同。

由此验证,在系统电压为正弦的情况下,基于瞬时无功功率理论的pq检测法与$i_p i_q$检测法均可及时地检测出三相谐波电流分量。实际上,如图5中电流波形的起始阶段所示,由于图2、3中含有低通滤器LPF,加上系统硬件实现过程中的延时,整个系统存在约3～8 ms的延时,但这一般可以满足工程要求。

4　结语

在瞬时无功功率理论的基础上,讨论了2种三相电流谐波电流检测方法——pq检测法与$i_p i_q$检测法的原理与系统结构。应用MATLAB对2种检测方法进行了仿真验证,通过对三相二极管不控整流阻容负载电路的仿真,验证了上述2种方法均可以实时地检测出三相谐波电流,并给出了仿真参数设置和仿真结果。

参考文献:

[1]　SHARON D. Reactive power definition and power factor improvement in nonlinear system[J]. Pro of IEE, 1973, 120(6): 704-706.

[2]　GYUGYI L. Reactive power generation and control by thyristor circuit[R]. Proc of IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1976.

[3]　王兆安,杨　君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社. 2002.

[4]　杨　君,王兆安. 三相电路谐波电流两种检测方法的对比研究[J]. 电工技术学报, 1995(2). 43-48.

[5]　Power System Blockset for Use with Simulink, User's Guide Version 1[M]. 1998.

[6]　吴天明,谢小竹,彭　彬. MATLAB电力系统设计与分析[M]. 北京:国防工业出版社, 2004.

[7]　王金星,王庆平,贾长朱,等. MATLAB在有源滤波器仿真设计中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001(4).

收稿日期: 2009-01-21
本文编辑:邵振华